

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 338.49, 338.24
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-39-67>

Поступила в редакцию | Received 26.05.2026
Подписана в печать | Accepted 16.06.2026
Опубликована | Published 30.06.2026

Проблема превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования

А. Г. Давыдовский^{1✉}, С. В. Кругликов²
✉E-mail: agd2011@list.ru

¹*Институт информационных технологий
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники,
ул. Козлова, 28, Минск, 220037, Беларусь*

²*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целью работы является анализ задачи превентивного управления рисками возникновения проблемных ситуаций и инцидентов при функционировании «умных сообществ» как нуклеарных структур больших организационных систем в условиях глобальной турбулентности на основе математических моделей с использованием интеграла Винера и винеровской энтропии.

Методы. Использован анализ литературных источников, метод математического моделирования с помощью интеграла Винера и феномена винеровской энтропии для превентивного управления рисками в «умных сообществах» как нуклеарных структурах больших организационных систем различного назначения в условиях влияния факторов глобальной турбулентности.

Результаты. Представлена общая характеристика проблемы превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах» как нуклеарных организационных системах. Обоснована целесообразность применения интеграла Винера и винеровской энтропии для анализа и превентивного управления рисками в «умных сообществах» в условиях системной турбулентности. Предложены математические модели, обеспечивающие различные этапы превентивного управления рисками проблемных ситуаций и опасных инцидентов в «умных сообществах» больших организационных систем на основе интеграла Винера. В частности, это модель идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера, модель раннего обнаружения и прогнозирования, модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками. Кроме того, предложены численные алгоритмы и валидация моделей, а также алгоритмы превентивного управления рисками в «умных сообществах».

Заключение. Разработаны основы подхода к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» как нуклеарных структурах больших организационных систем на основе интеграла Винера и винеровской энтропии.

Ключевые слова: глобальная турбулентность, большие организационные системы, «умные сообщества», интеграл Винера, винеровская энтропия, превентивное управление рисками, стохастическое моделирование

Для цитирования. Давыдовский, А. Г. Проблема превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования / А. Г. Давыдовский, С. В. Кругликов // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 39–67. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-39-67>.

Конфликт интересов. С. В. Кругликов является членом редакционной коллегии журнала «Информатика» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

The problem of preventive risk management in "smart communities" based on stochastic simulation

Anatoly G. Davidovsky^{1✉}, Sergey V. Kruglikov²
✉E-mail: agd2011@list.ru

¹*Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, st. Kozlova, 28, Minsk, 220037, Belarus*

²*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

Abstract

Objectives. The study aims to analyze the problem of preventive risk management for problematic situations and incidents in the functioning of "smart communities" as nuclear structures of large organizational systems under conditions of global turbulence based on mathematical models using the Wiener integral and Wiener entropy.

Methods. A review of the literature, a method of mathematical modeling using the Wiener integral and Wiener entropy phenomenon are applied for preventive risk management in "smart communities" as nuclear structures of large organizational systems for various purposes under the influence of global turbulence factors.

Results. A general description of the problem of preventive incident risk management in "smart communities" as nuclear structures of organizational systems has been presented. The expediency of using the Wiener integral and Wiener entropy for analysis and preventive risk management in "smart communities" in conditions of systemic turbulence is substantiated. Mathematical models are proposed that provide various stages of preventive risk management for problematic situations and dangerous incidents in "smart communities" within large organizational systems based on the Wiener integral. In particular, it is a risk identification and assessment model based on the Wiener integral, an early detection and forecasting model, and a model for optimizing preventive risk management strategies. In addition, numerical algorithms and model validation are proposed, as well as algorithms for preventive risk management in "smart communities".

Conclusion. The fundamentals of the approach to preventive incident risk management in "smart communities" as nuclear structures of large organizational systems based on the Wiener integral and Wiener entropy have been developed.

Keywords: global turbulence, large organizational systems, smart communities, Winner's integral, Wiener entropy, preventive risk management, stochastic simulation

For citation. Davidovsky A. G., Kruglikov S. V. *The problem of preventive risk management in "smart communities" based on stochastic simulation.* Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 2, pp. 39–67 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-39-67>.

Conflict of interests. S. V. Kruglikov has been a member of the editorial board of the journal "Informatics" since 2016 but had no role in the decision to publish this article. The article has undergone the journal's established peer-review process. The authors declare of no other conflicts of interest.

Введение

Во второй четверти XXI в. в формировании глобальной турбулентности важное значение приобретают следующие тенденции: гиперурбанизация и миграция человеческих ресурсов; экспоненциальный рост планетарной техносферы, масса которой уже сегодня значительно превосходит массу биосферы планеты и провоцирует глобальную социотехническую турбулентность [1], проявляющуюся в разрушении биосферы; разрушение традиционных социальных и производственных институтов, исторически сложившихся кооперативных сетей [2]; деградация человеческого потенциала и распространение «болезней цивилизации» [3, 4]; возникновение новых возбудителей инфекционных заболеваний и распространение эпидемий и пандемий с длительными социально-экономическими и биосоциальными последствиями (например, пандемия COVID-19 и последующий коронакризис) [5]; возрастание частоты негативных климатических событий с риском перехода в глобальную геоклиматическую катастрофу [6]; развитие цифровой ноосферы, основанной на глобальной сети Интернет с многочисленными облачными сервисами хранения информационных ресурсов; распространение военных и паравоенных событий, кибертерроризма и радикализма [7]; переход к пятой промышленной революции и развитие производительных сил на основе конвергентных нано- и биотехнологий, робототехники, генеративных нейротехнологий, облачных и квантовых вычислений, биотехнологий (технологий генетического редактирования CRISPR/Cas-9, синтетической биологии), мобильных автономных систем (беспилотников, роботов), децентрализованных финансовых технологий (блокчейна) и т. д. [8, 9]. Такие события, как технологическая концентрация обработки больших данных, включая дата-монополии, турбулентность рынков энергетического сырья и кредитования макроэкономического развития, массовое распространение технологий социальной инженерии, нейробрендинга и фейковых сообщений на фоне биосферной и социокультурной деградации [5, 9], обуславливают техногуманитарный дисбаланс современного постиндустриального мира [10].

Если в XX в. социально-экономические или социокультурные кризисы носили преимущественно локальный или временный характер, допуская относительно предсказуемое развитие событий и последствий, то 2020-е гг. стали качественно новым этапом в развитии глобальной турбулентности, отличающейся от предшествующих кризисов такими ключевыми характеристиками, как глобальное общество тотального потребления, гиперурбанизация, сверхэксплуатация и деградация природно-биосферных ресурсов, экспоненциальный рост техносферы, нарастающая геоклиматическая, социально-экономическая и биосоциальная нестабильность [11, 12]. При этом возрастает вероятность

нарушений жизнедеятельности больших организационных систем (БОС) в производственно-хозяйственной деятельности, административном управлении, здравоохранении, образовании, сфере услуг. Учитывая многомерность и тяжесть возможных социальных и социально-экономических последствий, особое значение приобретает возможность превентивного управления рисками нарушений функционирования БОС. При этом необходимо отметить важнейшую роль так называемых «умных сообществ», являющихся объединениями человеческих ресурсов, которые формируют и интегрируют вокруг себя материальные, информационные и энергетические ресурсы и потоки, технологии, иерархические, сетевые или гибридные организационные решения, а также контролируют активность различных акторов во внутренней среде БОС. Таким образом, «умные сообщества» являются ядерными (нуклеарными) когнитивно-социальными структурами внутри БОС.

Основная функция «умных сообществ» как нуклеарных социально-когнитивных структур заключается в обеспечении высокой управляемости и адаптивности БОС в условиях глобальной турбулентности. Такие нуклеарные социально-когнитивные структуры не противостоят организационному хаосу, а используют его как информационный, энергетический и материальный ресурс, обеспечивая навигацию БОС в пространстве событий системной турбулентности. При этом важную практико-ориентированную проблему представляют научно-методическое обеспечение и аппаратно-программная реализация информационных технологий превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах», составляющих основу жизнедеятельности «умных городов», которые относятся к различным поколениям [13].

Возникает потребность в динамическом, траекторном и вероятностном критериях оценки риска для анализа степени непредсказуемости и интенсивности последствий влияния стохастической системной турбулентности как на структурно-функциональное состояние БОС в целом, так и на жизнедеятельность их функциональной основы («умных сообществ») в частности. При этом динамический критерий оценки риска предусматривает непрерывный мониторинг и анализ состояний БОС в условиях быстро изменяющейся внутренней и внешней среды с течением времени для своевременного обеспечения приемлемого уровня безопасности и устойчивости системы. Траекторный критерий оценки риска основан на вероятности потери устойчивости БОС на траектории ее движения к намеченной цели или целевому состоянию (аттрактору). С позиций вероятностного критерия можно оценить риск как возможный неблагоприятный исход функционирования или состояния БОС, который характеризуется вероятностью и ущербом от неблагоприятного последствия. С помощью вероятностного критерия оценки риска можно ответить на три основных вопроса:

- 1) какова вероятность или частота возникновения событий, приводящих к последствиям, неблагоприятным для БОС;
- 2) каков характер событий, инициирующих неблагоприятные последствия;
- 3) насколько значительным является потенциальный ущерб от событий, инициирующих неблагоприятные последствия.

В качестве такого критерия меры риска негативных событий в сложной и (или) большой системе может быть предложена винеровская энтропия рисков как функционал стохастической динамики, связанный с интегральными характеристиками броуновского

(винеровского) процесса. При этом риск можно рассматривать не только как величину ожидаемых потерь, но и как свойство стохастической динамики, отражающее вариативность траекторий динамики БОС в пространстве возможных состояний. Особый интерес представляет интеграл Винера как фундаментальный инструмент стохастического анализа латентных событий и процессов в «умных сообществах» как нуклеарных когнитивно-социальных структурах больших социально-экономических и организационных систем. Его использование позволяет описывать процессы, в которых неопределенность носит непрерывный, кумулятивный и траекторно-зависимый характер [14]. В отличие от сугубо детерминированных или дискретных моделей винеровский аппарат применим к задачам мониторинга, селекции, прогнозирования и оптимального управления в среде случайных возмущений, возникающих во внешней и внутренней среде БОС и «умных сообществ».

Целью работы является анализ задачи превентивного управления рисками возникновения проблемных ситуаций и инцидентов при функционировании «умных сообществ» как нуклеарных структур БОС в условиях глобальной турбулентности на основе математических моделей с использованием интеграла Винера – эффективного инструмента стохастического анализа и прогнозирования рисков в больших и сложных системах.

1. Факторы глобальной турбулентности

Нарастающее неравенство как фактор нестабильности. Исследования [15, 16] убедительно показали, что нарастающее неравенство между социальными группами в доступе к материальным и информационным ресурсам служит мощным фактором дестабилизации БОС (*Iinequality*). Для феномена социальной нестабильности в БОС авторами предложено выражение, описывающее диффузионное взаимодействие социальных акторов на основе закона Фика:

$$I_{inequality} = G_{ini}(t) \frac{dG_{ini}(t)}{dt} PU, \quad (1)$$

где $G_{ini}(t)$ – показатель нарастающего неравенства между социальными группами по отношению к материальным и информационным ресурсам с течением времени t ;

PU (perception of uninjustice) – показатель восприятия социальной несправедливости общественным сознанием «умного сообщества».

Выражение (1) позволяет рассматривать и анализировать процессы социальной нестабильности в БОС на основе социофизических моделей, использующих положения теории диффузии (Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М. : Наука, 1987. – 502 с.).

Социальная поляризация и разрушение социального капитала «умных сообществ». Деградация социального капитала ослабляет способность «умных сообществ» к коллективному действию внутри и между БОС – критическому условию преодоления различных системных кризисов. Процесс деградации социального капитала можно представить с помощью дифференцируемой функции $SC(t)$:

$$\frac{dSC(t)}{dt} = (\alpha + f(T, R, N))SC(t), \quad (2)$$

где α – константа деградации социального капитала, $\alpha > 0$;

$f(T, R, N)$ – функция переменных «доверие», «взаимность», «связи» в «умных сообществах».

T – доверие, которое является характеристикой уверенности акторов (участников) социальных отношений в надежности своих партнеров, что можно охарактеризовать уровнем достоверности, %;

R – взаимность, которая является важнейшей характеристикой социального обмена и социальной жизни в целом конечный результат структурированного обмена продуктами социальной деятельности между диадическими и сетевыми партнерами;

N – как прямые, так и обратные связи между акторами социальных отношений в «умных сообществах».

Все рассмотренные переменные (2) априори являются неотрицательными.

Представленные далее выражения (2)–(6) предложены авторами на основе логистических моделей, рассмотренных в работе [17].

Миграционное давление. Нарастающие потоки вынужденной миграции вследствие экономических, социальных, климатических и конфликтных событий создают давление на принимающие общества, усиливая социальную напряженность, что можно представить с помощью дифференцируемой функции:

$$\frac{M_{forc}(t)}{dt} = (\beta + k_1 M_{clim}(t) + k_2 M_{conf}(t) + k_3 M_{econ}(t)) M_{forc}(t), \quad (3)$$

где β – константа потоков миграционного давления на «умное сообщество», $\beta > 0$;

$M_{clim}(t)$, $M_{conf}(t)$, $M_{econ}(t)$ – потоки миграции вследствие климатических причин, социальных конфликтов и экономических причин соответственно.

После простых преобразований (3) представляется вероятным, что к 2050 г. количество климатических мигрантов может составить 200–1000 млн человек [1, 3].

Кризис ценностных систем и социокультурные конфликты. Нарастающий конфликт $K(t)$ между глобалистскими и региональными, традиционалистскими и прогрессивными, секулярными и религиозными ценностными системами создает «ценностный разлом» в «умных сообществах»:

$$\frac{K(t)}{dt} = (\gamma + D(P_{values}, A(t) \| P_{values}, B(t))) K(t), \quad (4)$$

где γ – константа конфликтных отношений между группами с полярными ценностными ориентациями в «умном сообществе», $\gamma > 0$;

D – функция дивергенции между распределениями полярных ценностных ориентаций $A(t)$ и $B(t)$ двух различных социальных групп $(P, A(t))$ и $(P, B(t))$ в «умном сообществе».

Распространение дезинформации и разрушение целостной информационной картины реальности (*Information fragmentation(t), IF(t)*), разнообразные алгоритмические фильтр-пузыри и эхо-камеры создают эффект «разорванной информационной ткани» в «умном сообществе», при котором различные группы граждан живут в принципиально разных информационных реальностях:

$$\frac{dIF(t)}{dt} = (\delta + V(\text{Beliefs of groups})) IF(t), \quad (5)$$

где δ – константа распространения дезинформации и разрушения целостной информационной картины реальности, $\delta > 0$;

$V(\text{Beliefs of groups})$ – функция формирования эхо-камер для различных групп внутри «умного сообщества».

На основе уравнений (4) и (5) могут быть построены модели распространения дезинформации, приводящие к кризисам ценностных систем и провоцирующие социокультурные конфликты.

Климатический кризис как системный риск. Климатические изменения представляют собой глобальный климатический риск ($CR_{total}(t)$) – фактор, мультиплицирующий все остальные риски вне и внутри БОС:

$$\frac{dCR_{total}(t)}{dt} = (\varepsilon + R_{baseline} \times \Psi_{climate}(t)) CR_{total}(t), \quad (6)$$

где ε – константа зависимости «умного сообщества» от климатических изменений;

$R_{baseline}$ – базовый уровень климатического риска;

$\Psi_{climate}$ – функция многих переменных, являющаяся климатическим мультипликатором рисков, нарастающих во времени и обусловленных неопределенностью влияния климата на внешнюю и внутреннюю среду «умного сообщества».

Механизмы влияния климата на БОС включают: физические риски, экстремальные события вследствие разрушения инфраструктуры, рост уровня моря и как следствие потеря территорий, изменение характера осадков и последующий продовольственный стресс, обесценивание углеродных активов, регуляторные изменения, индустриально-климатические и социально-климатические риски (миграция населения, конфликты за ресурсы, политическая нестабильность).

Биосоциальная турбулентность (БСТ) обозначает специфический режим дестабилизации БОС, при котором биологические (пандемические, экологические, демографические), социальные (неравенство, поляризация, миграция) и культурно-ценностные (кризис идентичностей, культурные войны, нарратив-конфликты) возмущения интерферируют, создавая качественно новые риски, не редуцируемые ни к одному из составляющих типов.

По мнению авторов, БСТ может быть описана выражением

$$BST(t) = T_{bio}(t) \otimes T_{social}(t) \otimes T_{cultural}(t), \quad (7)$$

где $T_{bio}(t)$, $T_{social}(t)$, $T_{cultural}(t)$ – турбулентности в БОС, обусловленные биологическими, социальными и культурными факторами соответственно;

⊗ – нелинейный оператор взаимодействия, учитывающий мультипликативный эффект взаимодействия факторов биологической, социальной и культурной природы.

По мнению авторов, БСТ соответствует мультипликативному эффекту взаимодействия биологических, социальных и культурных факторов, что существенно превосходит аддитивный результат их взаимодействия:

$$BST(t) > T_{bio}(t) + T_{social}(t) + T_{cultural}(t). \quad (8)$$

С помощью уравнения (7) и неравенства (8) можно описать свойство супераддитивности БОС, смысл которой заключается в том, что совокупная турбулентность превышает сумму турбулентности каждого из компонентов.

Интерференция компонентов БСТ может быть как позитивной, так и негативной. Аналогично волновой интерференции БСТ может порождать зоны конструктивной (усиливающей) и деструктивной (гасящей) интерференции. Как следует из уравнения (8), взаимная мультипликативная индукция эффектов биологических, социальных и культурных факторов в больших системах является примером их позитивной интерференции:

$$\begin{aligned} {}^+BST(t) &= (T_{bio}(t) + T_{social}(t) + T_{cultural}(t))^2 > \\ &> T_{bio}^2(t) + T_{social}^2(t) + T_{cultural}^2(t) \end{aligned} \quad (9)$$

при условии, что $T_{bio} > 0$, $T_{social} > 0$, $T_{cultural} > 0$.

Можно привести иллюстрации для (9). Например, возможные цепочки событий формируют автоиндуцируемые процессы: биологические (пандемия) → социальные (социальный стресс) → культурные (распространение идей конспирологии, алармизма, антиинституционализма) → экономические (локдаун) → социальные (снижение доверия к вакцинам) → биологические (усугубление пандемии). Подобная последовательность создает замкнутый контур взаимного усиления негативных событий.

Негативная интерференция обусловлена взаимным гашением при совместном влиянии факторов в больших системах.

Вследствие интерференции возможны феномены, когда высокий уровень социального доверия (социальный капитал) может гасить биологические риски путем успешной вакцинации и культурные – путем повышения устойчивости сообществ к дезинформации.

Биологические факторы. Пандемия COVID-19 продемонстрировала, как биологические угрозы способны вызывать глубочайшие экономические, социальные и политические трансформации, формирующие ситуацию глобальной турбулентности и дезорганизующие жизнедеятельность БОС в здравоохранении, образовании, логистике, сфере услуг [11]. Авторами предложена формула для оценки пандемического риска ($R_{pandemic}$) на основе функции шести переменных:

$$R_{pandemic} = F(R_0, IFR(t), \tau_{detection}, Conn_{global}, Cap_{health}, t), \quad (10)$$

где F – функция шести переменных, включая:

R_0 – базовый репродуктивный номер; $IFR(t)$ – уровень смертности от инфекций (infection fatality rate);

$\tau_{detection}$ – время до обнаружения;

$Conn_{global}$ – уровень вовлеченности;

Cap_{health} – потенциал здоровья;

t – время.

Пандемический риск можно описать непрерывной функцией после преобразования (10). Его размерность можно определить произведением вероятности распространения инфекционного заболевания на долю, которую составляют лица с клиническими признаками заболевания, от всей численности человеческой популяции.

Демографический стресс. Нарастающее демографическое расхождение между «стареющим» Севером и «молодым» Югом ($[North - d(Youth Bulge)]$) создает долгосрочный демографический дисбаланс ($\Delta_{demo}(t)$), так или иначе затрагивающий все страны северного полушария, включая Республику Беларусь. Из работы [17] следует, что явление можно охарактеризовать как демографический стресс на основе формулы дифференциального управления

$$\Delta_{demo}(t) = \zeta \frac{dOAR}{dt} [North - d(Youth Bulge)], \quad (11)$$

где ζ – константа долгосрочного демографического дисбаланса;

OAR (*Old Aging Ratio*) – коэффициент старения населения страны, принимающей миграционные потоки.

Принимая во внимание (1)–(11), превентивное управление рисками, возникающими в БОС, может быть основано на таких принципах, как раннее обнаружение рисков, прогнозирование сценариев, оптимизация стратегий эволюции системы. При этом в отличие от реактивного подхода к управлению рисками превентивное управление направлено на предотвращение, а не ликвидацию негативных последствий влияния рассмотренных факторов.

2. Проблема превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах»

Отдельную проблему, заслуживающую пристального внимания, представляет формализация неопределенности риска в структурно-функциональной целостности и жизнедеятельности «умных сообществ», которые являются нуклеарными социально-когнитивными структурами БОС на основе винеровских стохастических моделей.

В настоящее время очевидно противоречие между знаниями о масштабах и последствиях возникновения различных инцидентов в «умных сообществах», относящихся к различным поколениям «умных городов» и «умных урбанизированных экосистем», с одной стороны, и уровнем фундаментальных и прикладных знаний, развития моделей, алгоритмов и методов превентивного управления рисками возникновения потенциально опасных технологических, социальных, социотехнических, социально-экономических и экологических проблемных ситуаций при эволюции различных поколений «умных городов» и «умных урбанизированных экосистем», с другой стороны [15, 18].

«Умные сообщества», будучи ядром – нуклеарной социально-когнитивной структурой – БОС, в условиях нарастающих проявлений системной биосоциальной, антропо-технологической и социально-экономической турбулентности демонстрируют свойства не статической, а быстро эволюционирующей динамической структуры, способной к гибридации с сетечетрическим управлением, распределенными ресурсами и непрерывно перестраиваемой логистикой. В связи с широким развитием технологий «умных городов» и «умных урбанизированных экосистем» представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес изучение факторов, причин и механизмов возникновения и развития различных технологических, социальных, экономических и экологических инцидентов в «умных сообществах» как эволюционирующих социотехнических системах.

Превентивное управление рисками возникновения инцидентов в больших социальных системах требует заблаговременного обнаружения «триггерных» состояний. Для описания этих явлений целесообразно использовать социофизическую стохастическую модель вероятности диффузии социальных компонентов БОС, основанную на модифицированном уравнении Фоккера – Планка для одномерного случая в частных производных (Risken, H. *The Fokker-Planck Equation: Methods of Solutions and Applications*. – 2nd ed. – Springer, 1984. – 452 p.), которое описывает эволюцию функции вероятности P_i состояния i -го социального компонента БОС во времени:

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} [A(x_i, t)P(x_i, t)] + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B(x_i, t)}{2} \frac{\partial}{\partial x} P(x_i, t) \right), \quad (12)$$

где $A(x_i, t)$ – функция, описывающая состояние исследуемой БОС по компоненту x_i в момент времени t ;

$B(x_i, t)$ – стандартное N -мерное броуновское движение социального компонента системы x_i ;

$P(x_i, t)$ – функция плотности вероятности, описывающая состояние социального компонента x_i как стохастический процесс.

Состояние i -го социального компонента БОС в (12) – это набор его качественных и количественных характеристик, изменение которых со временем свидетельствует о переходе в другое состояние.

Модели, подобные (12), могут быть использованы для моделирования и системного анализа социальных систем, например, в условиях глобальных миграционных кризисов и социальных конфликтов.

Одним из наиболее парадоксальных и практически значимых открытий теории сложных систем является то, что увеличение связности большой системы сверх определенного порога ведет не к повышению, а к снижению ее устойчивости. При этом гиперконцентрация ресурсов, власти и функций в узловых агентах системы создает системообразующие узлы (так называемые too big to fail-уязвимости), отказ которых неизбежно влечет системный коллапс с вероятностью $P_{ск}$ при превышении некоторого порогового уровня P_p .

Для БОС характерны сетевые структуры, узлы в которых нередко имеют много связей с другими узлами. Количество связей узла с другими узлами называется степенью

узла сети, а распределение степеней узлов определяет распределение вероятностей степеней во всей сети, которая составляет основу БОС. В таких сетях, которые можно назвать «сетями со степенным распределением» (scale-free networks), высока устойчивость к случайным отказам. Это представляет особый интерес в условиях геополитической и социально-экономической турбулентности, когда транспортные, энергетические, ресурсные хабы и дата-центры становятся чрезвычайно уязвимыми к целенаправленным атакам различного характера.

Как следует из работы [17], комплексную устойчивость БОС (sustainability $S(t)$) можно описать дифференциальным уравнением логистической функции, включающей буферную способность, резервные ресурсы и организационно-функциональную напряженность (buffering capacity, BC; reserve resources, RR; organizational and functional tension, OFT):

$$\frac{dS(t)}{dt} = (\eta + f(BC, RR, OFT))S(t), \quad (13)$$

где η – константа комплексной устойчивости БОС.

Принимая во внимание (13), необходимо отметить, что максимально оптимизированная по структуре и функциям большая система может быть минимально устойчивой как к внешним, так и внутренним возмущениям. Оптимизация по краткосрочной эффективности систематически снижает долгосрочную устойчивость БОС к воздействию условий внешней среды, в том числе вследствие феномена институционального дрейфа.

Институциональный дрейф (Δ_{inst}), обуславливающий формирование латентных рисков в БОС, – это постепенное расхождение между формальными правилами ($R_{formal}(t)$) и реальными практиками акторов, обеспечивающих функционирование БОС ($R_{actual}(t)$), что создает скрытые уязвимости, которые становятся видимыми только на продолжительных интервалах времени в условиях организационного стресса. При этом институциональный дрейф можно представить как вектор в нормированном векторном пространстве [19]:

$$\vec{\Delta}_{inst} = \|\vec{R}_{formal}(t) - \vec{R}_{actual}(t)\|t. \quad (14)$$

Регуляторный лаг (14) – это временной разрыв между появлением нового риска в БОС и формированием адекватного регуляторного ответа в условиях ускорения технологических трансформаций (например, при внедрении искусственного интеллекта (ИИ) в процессы принятия управленческих решений) – может значительно увеличиться. Для цифровых технологий (ИИ, криптоактивы, социальные сети) этот лаг составляет от 3 до 15 лет, в течение которых системы функционируют в правовом и образовательном вакууме, накапливая системные риски.

Нарастающая полицентричность в глобальной мировой системе при одновременной деградации традиционных институтов управления формирует «управленческий вакуум» для глобальных факторов, создающих риски функционирования БОС и способствует фрагментации управления ими.

Возникающие технологические разрывы и «сдвиги парадигм» приводят к быстрому обесцениванию и деградации существующих компетенций персонала, инфраструктур и бизнес-моделей БОС вследствие появления принципиально новых технологий, таких как интернет вещей, робототехнические комплексы, беспилотный транспорт и ИИ [11, 12]. Данные факторы при совместном влиянии способны вызвать длительные дестабилизирующие эффекты в больших социально-экономических системах, например производственных объединениях, холдингах, логистических хабах, многопрофильных индустриальных компаниях, а также организациях образования, здравоохранения и жилищно-коммунальной сфере. Это создает новый тип системного риска – информационную гегемонию с возможностью манипуляции принятием решений миллиардами человек на основе обработки потоков больших данных. При этом возрастает технологическая уязвимость объектов критической инфраструктуры – энергетики, транспорта, финансовой сферы, здравоохранения, медиа. В период с 2021 по 2026 г. стремительный рост демонстрируют атаки на цепочки поставок, что приобретает особое значение в контексте усложнения глобальных логистических связей и растущей зависимости от технологических партнеров¹. Увеличение риска киберугроз создает системную уязвимость нового типа с тяжелыми социально-экономическими последствиями.

3. Превентивное управление рисками инцидентов в «умных сообществах» как стохастический процесс

Переход к превентивному управлению рисками представляет собой идентификацию, прогнозирование и нейтрализацию рисков до их реализации и является императивом современной теории и практики управления сложными системами. При этом в жизнедеятельности «умных сообществ» ключевую роль играют социальные, технологические, технические, киберфизические, экономические, управленческие, институциональные риски деградации человеческого капитала, а также экологические, биотоксикологические, информационно-психологические, психофизиологические и инклюзивные риски [5].

Превентивное управление всем комплексом таких рисков в «умных сообществах», соответствующих различным поколениям «умных городов», – это комплексный процесс, направленный на выявление, оценку и минимизацию потенциальных угроз для устойчивой и безопасной жизнедеятельности «умных сообществ» на основе использования разнообразных методов, алгоритмов и сценариев, учитывающих технические, социальные, экологические и экономические аспекты. Технологии превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах» целесообразно основывать на стохастических, байесовских и биоинспирированных моделях и алгоритмах оптимизации.

Эволюция «умного сообщества» как нуклеарной когнитивно-социальной структуры, составляющей основы БОС, осуществляется в пространстве состояний, соответствующих различным событиям $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, может быть описана стохастическим дифференциальным уравнением [14]

$$\frac{S(t)}{dt} = f(x(t), u(t), t) + \frac{1}{dt} \sum_{k=1}^n (x(t)_i, u(t)_j, t) dW_{ij}(t), \quad (15)$$

¹Критическая инфраструктура и стратегическая стабильность в эпоху конвергенции угроз. – URL: <https://ru.valdaiclub.com/a/highlights/stratstabilnost-v-epokhu-konvergensii-ugroz/> (дата обращения: 23.06.2026).

где $x(t)$ – i -й компонент БОС;

$u(t)$ – j -е управляющее воздействие (политика управления) в БОС;

$W(t)$ – винеровский процесс (возможно, многомерный, с согласованной размерностью) в отношении i -го компонента и j -го управляющего воздействия в БОС;

f – дрейф (детерминированная динамика);

$\sum_{k=1}^n (x(t)_{ki}, u(t)_{kj}, t) dW(t)$ – сумма, описывающая все винеровские процессы стохастических возмущений при управлении БОС.

В качестве компонента (t) может выступать активный актор, технология, бизнес-процесс, информационный, материальный, энергетический ресурс, иерархический уровень и узел сети в организационной структуре БОС.

Для описания эволюции «умного сообщества» (15) необходим винеровский процесс (броуновское движение) $W_{ij}(t)$ при $t \in [0, T]$, который может быть представлен как случайный вектор $(W_{t_1}, W_{t_2}, \dots, W_{t_n})$, $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n \leq T$, имеющий гауссовское распределение с траекторией, непрерывной при всех $t \in [0, T]$.

Предположим, что риск негативных событий в БОС проявляется через траектории $x(t)$. Введем безопасное множество $S \subset \mathbb{R}^n$. Риск R_S можно интерпретировать как выход системы из некоторого состояния S . При этом важную роль играет неопределенность внутри траектории эволюции «умного сообщества» БОС. Для решения данной задачи целесообразно ввести энтропийную (информационную) характеристику.

4. Винеровская энтропия рисков в «умных сообществах» в условиях системной турбулентности

В контексте энтропии как «меры непредсказуемости» стохастических процессов энтропийные меры часто интерпретируют как величины, описывающие степень неопределенности распределения траекторий. Для винеровской динамики естественно связывать эту неопределенность с интенсивностью диффузионной компоненты и потерями (затратами) информационных ресурсов, необходимыми для изменения мер вероятности на пространстве траекторий.

В настоящей работе предложена гипотеза винеровской энтропии рисков как вероятностного функционала, задающего объем и непредсказуемость траекторий состояний «умного сообщества» БОС под влиянием факторов глобальной турбулентности в терминах интеграла Винера и связанных с ним стохастических процессов. Ниже предварительно показано, что введенная мера энтропии позволяет:

- количественно различать режимы турбулентности неопределенности;
- конструировать ранние индикаторы ухудшения состояния системы;
- увязывать риск с принципами управления по ограничению вероятности выхода из безопасного множества и по хвостовым критериям.

Представлены аналитические свойства винеровской энтропии в базовой постановке, а также схема численной оценки и интерпретации для практических задач управления. На уровне методологии обсуждаются границы применимости и направления дальнейших исследований.

Пусть в рассматриваемой модели стохастическая часть задается винеровским процессом, а функциональный риск $R[x(\cdot)]$ учитывает небезопасность траектории. При этом вводится понятие винеровской энтропии рисков [14]:

$$\varepsilon_W(R) = -\mathbb{E}[\log P_R(R[x(\cdot)])], \quad (16)$$

где $P_R(\cdot)$ – плотность (или обобщенная плотность) распределения риска $R[x(\cdot)]$.

Вместе с тем винеровская энтропия рисков (16) достаточно сложна для аналитического вывода. Поэтому применяется эквивалентная постановка в терминах энтропии правдоподобия и относительной энтропии между мерами траекторий в режиме риска и базовом (контрольном) режиме.

Винеровскую энтропию можно связать с параметрами диффузии и интенсивностью управляющего воздействия, необходимого для перехода БОС в режим с повышенным риском.

Свойства винеровской энтропии и связь с интегралом Винера. Пусть происходит изменение меры посредством сдвига дрейфа на величину $\theta(t)$, согласованную с диффузией. Тогда энтропийная характеристика системы может быть выражена с помощью интеграла вида [14]

$$\int_0^T \theta(t)^T dW(t), \quad (17)$$

где $W(t)$ – винеровский процесс с энтропией.

При фиксированной форме управления событием, приводящим к риску, увеличение диффузионной составляющей, например интенсивности винеровской турбулентности, неизбежно приводит к возрастанию энтропии в системе, что можно рассматривать как индикатор деградации большой системы под влиянием накапливающихся в ней нарушений и поломок. Процесс такой деградации большой системы может быть охарактеризован с помощью интеграла (17).

Как следует из уравнения (16), энтропия зависит от того, как именно задан $R[x(\cdot)]$ (выход за границу, хвостовые потери, комбинированная штрафная функция). Интеграл Винера хорошо описывает броуновскую диффузию, но в ряде прикладных ситуаций могут доминировать «скачки», «спайки» или «тяжелые хвосты» распределения. Тогда требуется расширение до процессов с разрывами или обобщенных диффузий. Ошибки в оценке диффузии напрямую изменяют энтропийную меру.

Подход с применением винеровской модели может быть использован для анализа рисков в широком спектре больших социально-экономических систем. При этом $x(t)$ является вектором макропоказателей (волатильность, ликвидность, показатели напряженности, интегральные индексы неопределенности). Стохастическая составляющая моделирует внешние шоки, неучтенные факторы, шум наблюдения и неполную идентификацию. Биосоциальные кризисы проявляются как события выхода в критическую область (например, превышение порогов неустойчивости). Винеровская энтропия может

использоваться для различения периода нормальной вариативности и периода достижения кризисного режима за счет достаточно меньшего смещения. При этом БОС становится статистически ближе к опасному переходу.

Триггерами превентивного вмешательства для обеспечения устойчивого функционирования БОС являются критерии, формируемые на основе $\varepsilon_{W(t)}$ и определяемые локально по окну наблюдений: когда энтропия превышает порог, следует активировать профилактические меры; когда энтропийная динамика ускоряется, необходимо менять политику управления заранее.

Энтропийное ограничение позволяет действовать на неопределенность траекторий, а не только на средний уровень риска дезорганизации функционирования «умных сообществ» как нуклеарных когнитивно-социальных структур, обеспечивающих быструю рефлексивную и превентивную адаптацию БОС к рискам инцидентов, обусловленным влиянием факторов глобальной турбулентности.

Существующие модели превентивного управления можно условно разделить на три группы:

- пороговые индикаторные модели;
- сценарно-экспертные модели;
- модели машинного обучения и прогнозной аналитики.

Индикаторные модели просты, но слабо чувствительны к скрытым изменениям режима функционирования больших и сложных систем, в которых присутствует эффект «шума событий». Сценарные модели учитывают контекст, но зависят от субъективности экспертов. Модели машинного обучения способны обнаруживать сложные зависимости, однако нередко страдают недостаточной интерпретируемостью и нестабильностью при изменении режима генерации данных. В этой ситуации математически прозрачные стохастические модели, основанные на интеграле Винера, позволяют занять промежуточную позицию между строгостью, интерпретируемостью и адаптивностью.

В отличие от обычного интеграла Римана – Стильбеса интеграл Винера определяется по траекториям, не имеющим ограниченной вариации. В отличие от стохастических интегралов более общего типа он выступает базовой конструкцией для моделирования броуновских шумов и непрерывных случайных флуктуаций.

Как следует из работы [14], в ряде случаев динамика состояния системы $X(t)$ может быть определена стохастическим дифференциальным уравнением

$$dX(t) = a(x(t), u(t))dt + b(x(t), u(t))dW(t). \quad (18)$$

Тогда риск критического события в БОС, формируемый со временем, может быть определен как вероятность достижения опасного состояния. Процесс достижения системой такого состояния может быть описан с помощью уравнений (16)–(18).

Важно учитывать факт достижения не только критической области, но и предкризисных флуктуаций и как следствие – накопление рисков возникновения проблемных ситуаций в организационных, организационно-технических и социально-экономических системах. В этой связи, по мнению авторов, целесообразно ввести функционал траектории риска нарушения управляемости (дезорганизации) «умного сообщества» как ядра более крупной, но организационно менее сложноструктурированной большой системы:

$$R(t) = \mathbb{E} \left[\int_0^T q(X(t), t) + \Psi(X(T)) + \lambda \sup_{t \in [0, T]} h(X(t)) \right], \quad (19)$$

где $q(X(t), t)$ характеризует текущую интенсивность риска, $\Psi(X(T))$ отражает терминальный ущерб, $h(X(t))$ описывает близость к опасному режиму функционирования «умного сообщества».

Следует отметить, что уравнение (19) позволяет учитывать микрофлуктуации, часто предшествующие кризису управляемости БОС. При этом использование винеровского интеграла дает возможность моделировать диффузионную составляющую неопределенности, представленную непрерывными малыми флуктуациями, накапливающимися во времени. Эволюцию события X_t позволяет описать стохастическое дифференциальное уравнение вида [14]

$$dX_t = \mu(t, X_t)dt + \sigma(t, X_t)dW_t, \quad (20)$$

где μ – детерминированный дрейф (тренд);

σ – коэффициент волатильности (интенсивность случайного воздействия).

Превентивное управление рисками в БОС в контексте уравнений (19) и (20) означает воздействие на параметры μ и σ с целью удержания траектории X_t состояний системы в допустимой области до достижения критического порога.

5. Подход к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» на основе интеграла Винера

Для обоснования целесообразности подхода к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» как нуклеарных социально-когнитивных структурах БОС в условиях воздействия факторов глобальной турбулентности можно рассмотреть управляемую стохастическую систему на основе положений, представленных в [14]

$$dX_t = f(t, X_t, u_t)dt + G(t, X_t)dW_t, \quad X_0 = x_0, \quad (21)$$

где $X_t \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния системы (многомерный вектор рисков факторов);

$u_t \in U \subset \mathbb{R}^m$ – вектор управляющих воздействий (превентивных мер);

$f: [0, T]$ – функция дрейфа;

$G: [0, T]$ – матрица диффузии;

$W_t \in \mathbb{R}^n$ – многомерный процесс Винера;

n – число возможных состояний системы;

m – число возможных управляющих воздействий в системе.

С учетом равенства (21) в общем случае задача превентивного управления $J(u)$ может быть сформулирована как задача стохастической оптимизации [19]

$$\min_{u \in U} J(u) = \mathbb{E} \left[\int_0^T L(t, X_t, u_t)dt + \Psi(X_T) \right], \quad (22)$$

где $L(t, X_t, u_t)$ – текущие затраты на мероприятия по превентивному управлению рисками потери устойчивости БОС и больших организационно-технических систем;

$\Psi(X_T)$ – терминальные функции потерь в условиях воздействия факторов глобальной турбулентности.

Модель идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера. Пусть наблюдаемый процесс $Y(t)$ связан со скрытым состоянием риска $Z(t)$ следующим образом:

$$Y(t) = H(X(t), Z(t), t) + \varepsilon(t), \quad (23)$$

где $\varepsilon(t)$ – информационный шум наблюдения состояния БОС.

Тогда скрытое состояние риска $Z(t)$ в (23) можно оценить с помощью моделей линейной или нелинейной регрессии с учетом количества и характера взаимосвязи уровня параметров функциональной и организационной сложности БОС и соответствующего «умного сообщества».

Как следует из [14], динамика скрытого риска может быть выражена уравнением

$$dZ(t) = \alpha_Z(Z(t), X(t), t)dt + \beta_Z(Z(t), X(t), t)dW(t), \quad (24)$$

где α_Z и β_Z – функции от $Z(t)$, $X(t)$ и t .

Допуская динамику скрытого риска (24), а также на основе (20), (21) и (24) можно определить мгновенный риск как функцию нескольких переменных

$$r(t) = f(X(t), Z(t), u(t), t), \quad (25)$$

а агрегированный риск негативных событий в БОС на горизонте $[t, t + \tau]$ – равенством

$$R_{t,T} = \mathbb{E}_t \left[\int_t^{t+\tau} r(s) ds + X(\tau_c \leq t + \tau) \right], \quad (26)$$

где τ_c – момент первого достижения критической области диапазона риска потери устойчивости БОС.

На основе (25) и (26) могут быть выделены наблюдаемые симптомы изменения состояния БОС из скрытой стохастической динамики нарастания риска.

Модель раннего обнаружения и прогнозирования рисков. Для раннего обнаружения вводится предиктор приближения к критическому режиму:

$$S(t) = \int_{t-\Delta}^t \kappa(t-s)dW(s), \quad (27)$$

где $\kappa(\cdot)$ – ядро чувствительности системы к недавним флуктуациям во внешней среде.

Рост дисперсии и автокорреляции функционала $S(t)$ в уравнении (27) интерпретируется как индикатор критического замедления или приближения к бифуркационному режиму. При этом вероятность условного перехода системы в опасное состояние на горизонте τ :

$$P_c(t, \tau) = \mathbb{P}_t(\tau_c \leq t + \tau | R(t)). \quad (28)$$

В целом на основе положений (25)–(28) может быть осуществлено прогнозирование рисков приближения БОС к критическому режиму.

Модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками. Оптимальное превентивное управляющее воздействие U^* выбирается из множества допустимых. По мнению авторов, модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками U^* можно представить как решение задачи

$$U^* = \operatorname{argmin}_{u \in U} \mathbb{E} \left[\int_0^T (c_1 r(t) + c_2 \|U(t)\|^2 + c_3 \varphi(X(t))) dt + c_4 \Gamma(X(T)) \right], \quad (29)$$

где c_1 – задает цену текущего риска;

c_2 – отражает стоимость управляющего воздействия;

c_3 – определяет потенциальный штраф при нахождении системы в зоне уязвимости;

c_4 – учитывает терминальные потери;

$\Gamma(X(T))$ – функция гамма-распределения состояния системы в период времени T .

Интеграл Винера входит в модель (29) не как вспомогательный элемент, а как базовый механизм описания неопределенности, влияющий и на оценку риска, и на стратегии превентивного управления рисками в БОС.

Численные алгоритмы и валидация моделей. Для систем с нелинейной динамикой целесообразно применять метод Монте-Карло с квазислучайными последовательностями Соболя для приближенного вычисления функционалов Винера. Валидацию следует проводить методом кросс-валидации на временных рядах с такими метриками, как Mean Squared Error (MSE) – среднеквадратичное отклонение, Information Ratio – коэффициент информационного отношения, Lead Time – среднее время опережения сигнала предупреждения по отношению к решению риска.

Необходимо построить модель, которая идентифицирует формирующиеся риски на ранней стадии; оценивает вероятность и интенсивность перехода к критическому состоянию; вырабатывает оптимальное превентивное воздействие с учетом ограничений по ресурсам, времени и допустимым последствиям. Для этого вводится архитектура модели с тремя уровнями: состояния системы, скрытого процесса риска и управления.

Алгоритмы превентивного управления рисками в «умных сообществах». Для алгоритмизации превентивного управления рисками инцидентов дезорганизации в «умных сообществах» предложена методология, которая реализуется в виде последовательности вычислительных процедур, организованных в три различных алгоритма: идентификации скрытого риска, раннего обнаружения критических режимов, оптимизации превентивного управляющего воздействия.

В частности, алгоритм 1 идентификации скрытого риска включает:

- сбор многоканальных временных рядов по индикаторам состояния системы;
- предварительную фильтрацию шумов и устранение выбросов;

– оценку параметров $\alpha(\cdot)$ и $\beta(\cdot)$ на основе методов максимального правдоподобия или байесовской фильтрации;

– реконструкцию скрытого процесса риска $Z(t)$.

Алгоритм 2 раннего обнаружения критических режимов включает:

- расчет винеровских функционалов на скользящем окне;
- оценку условной вероятности достижения критической области;
- сравнение текущих значений с адаптивными порогами;
- генерацию предупреждения и ранжирование рисков по критичности.

Алгоритм 3 оптимизации превентивного управляющего воздействия включает:

- задание множества допустимых действий;
- моделирование траекторий системы методом Монте-Карло;
- оценку ожидаемого ущерба и стоимости вмешательства;
- поиск стратегии, минимизирующей функционал потерь;
- пересчет стратегии в режиме «удаляющегося горизонта» при поступлении новых данных.

В рамках предлагаемого подхода представлены математические модели, обеспечивающие различные этапы превентивного управления рисками проблемных ситуаций и опасных инцидентов в «умных сообществах» БОС на основе использования интеграла Винера. В частности, это модель идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера, модель раннего обнаружения и прогнозирования, модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками. Кроме того, предложены численные алгоритмы и валидация моделей, а также алгоритмы превентивного управления рисками в «умных сообществах».

===== 6. Режимы функционирования «умных сообществ» в условиях глобальной турбулентности

В условиях глобальной социально-экономической, социотехнической и биосоциальной турбулентности режимы функционирования «умных сообществ» как ядра БОС могут обеспечивать их устойчивость через адаптацию, сохранение целостности, самоорганизацию и реорганизацию либо деградацию и дезорганизацию. Данные процессы определяют их способность выживать и эволюционировать. В этих условиях можно выделить шесть ключевых режимов функционирования «умных сообществ» в БОС: выживания (реактивный), ограничения деятельности и потребления ресурсов (режим сжатия), адаптивной стабилизации (регулирующий), трансформации (проактивный), сценарной гибридизации в соответствии с прогнозируемыми вызовами (превентивный), дезорганизации и саморазрушения (эсхатологический).

В режиме выживания (реактивном) «умные сообщества» реагируют на немедленные угрозы, фокусируясь на базовом сохранении целостности. При этом адаптация БОС к внешним вызовам минимальна, преобладает рефлекторная самоорганизация: сокращение внешних связей, мобилизация внутренних ресурсов. Например, локальные социальные группы во время кризиса перераспределяют ресурсы (еду, энергию, территорию, человеческий потенциал), нередко игнорируя долгосрочные планы. Цель таких действий – сохранение БОС.

Режим ограничения деятельности и потребления ресурсов (режим сжатия) сосредотачивает усилия сообщества на ресурсо- и энергосбережении в условиях глобальной турбулентности. «Умное сообщество» ограничивает свои потребности, сокращает (сжимает) масштабы, минимизируя расход ресурсов для поддержания ограниченного функционирования БОС, ее самоорганизации, ужесточения иерархии и рационализации структур. Например, «умный город» в условиях дефицита энергоресурсов может снизить потребление на 30–50 %, отключая малосущественные сервисы. Это стабилизирует систему, но тормозит рост.

Режим адаптивной стабилизации (регулирующий) заключается в том, что сообщество активно регулирует внутренние процессы для баланса. Адаптация сочетается с реорганизацией на основе использования алгоритмов ИИ, которые оптимизируют потоки данных и ресурсы. Так, цифровые платформы наподобие SingularityNET корректируют цепочки поставок в реальном времени. Целостность БОС сохраняется через циклы, обеспечивая обратные связи, что минимизирует хаос.

Режим трансформации (проактивный) предусматривает перестройку структур под возможные сценарии превентивного управления рисками. Самоорганизация эволюционирует в инновационные формы, такие как децентрализованные логистические сети и сети услуг, которые быстро реорганизуются в соответствии с новыми вызовами. Примерами здесь могут быть сообщества на основе технологий блокчейн, технологии искусственного и гибридного интеллекта, деятельность которых сфокусирована на росте и усилении устойчивости БОС к вызовам, обусловленным факторами глобальной турбулентности.

Режим сценарной гибридизации (превентивный) предусматривает адаптацию сообществ путем моделирования сценариев и стратегий, а также гибридизации сценариев и стратегий, используемых заранее. В данном режиме адаптация носит превентивный характер: комбинирует культуры управления, технологии и экономики через симуляции с помощью агентного моделирования. Примером являются «умные экосистемы», например NEOM в Саудовской Аравии. Футуристический проект осуществляется с 2017 г. под председательством саудовского наследного принца Мухаммеда бин Салмана на принципах аркологии – архитектурно-градостроительной концепции возведения компактных городов и размещения множества людей на ограниченной территории, расположенной на крайнем северо-западе Саудовской Аравии в административном округе Табук на общей площади в 26 500 км². Его стоимость составляет 500 млрд долл. США².

Режим дезорганизации и саморазрушения (эсхатологический) предусматривает критические сбои, включая потерю целостности и доминирование энтропии. В этом режиме самоорганизация БОС переходит в хаос, структура системы становится жесткой, что исключает адаптивную реорганизацию. Примером является коллапс сетей криптовалютной биржи FTX из-за каскадных ошибок доверия на Багамах в ноябре 2022 г. Крах FTX, вызванный резким выводом средств клиентами, послужил толчком к ее банкротству. До своего краха FTX была третьей по величине криптовалютной биржей по объему

²Saudi Arabia Just Announced Plans to Build a Mega City That Will Cost \$500 Billion. – URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-24/saudi-arabia-to-build-new-mega-city-on-country-s-north-coast> (date of access: 30.04.2026).

и насчитывала более миллиона пользователей. При этом «умное сообщество» дезорганизуется, если не активировать ранние режимы.

«Умное сообщество» может использовать факторы глобальной турбулентности как драйвер для качественного изменения своей структуры. Происходит реконфигурация смыслов и ролей. «Умное сообщество» использует кризис для реорганизации своих компетенций, внедрения новых инструментов (ИИ, блокчейн) и расширения границ своего влияния. Для БОС, управляемых такими «умными сообществами», характерна стратегическая реструктуризация с переходом от вертикальных иерархий к сетевым или «экосистемным» моделям, причем инвестиции в инновации являются всего лишь способом изменения рыночной или социальной позиции «умного сообщества». Необходимо отметить, что жизнедеятельность «умных сообществ» как нуклеарных когнитивно-социальных структур БОС в условиях цифровой трансформации возможна лишь на основе высокой степени автоматизации процессов превентивного (а далее – преэмптивного) управления рисками функционирования БОС в диалоговом режиме. При этом человек управляет решением задачи, изменяя ее условия и (или) порядок функционирования системы на основе оценки информации, предоставляемой ему техническими сенсорными устройствами и средствами отображения информации [18]. Как известно, объект гарантированно может достигнуть своих целей, только если он управляем, а приложенное к нему управление принадлежит к классу видов управлений с отрицательными обратными связями [20].

7. Практические кейсы стохастических моделей управления «умными сообществами» и БОС

«Умные сообщества» как нуклеарные когнитивно-социальные структуры БОС способны к самоорганизации, рефлексивному управлению и адаптивной реконфигурации в условиях воздействия внешних шоков, внутренних противоречий и факторов глобальной турбулентности. В организации «умными сообществами» БОС в различных сферах социальной практики используются как формальные, так и неформальные методы, позволяющие осуществлять превентивное управление их жизнедеятельностью, предупреждая отдельные негативные изменения, обусловленные вызовами, угрозами и рисками, которые в настоящее время неочевидны.

В сфере производства БОС – это интегрированный организационно-технологический комплекс с цепочками создания стоимости от добычи ресурсов до конечного продукта, включающий производственные мощности, логистические узлы, технологические платформы и человеческий капитал, которые организованы в единую систему с управляемыми потоками материи, энергии, информации и финансов.

В сфере услуг БОС – это динамическая сервисная экосистема, генерирующая нематериальную ценность через многомерные взаимодействия провайдеров и потребителей с цифровыми платформами, институциональными нормами и поведенческими алгоритмами. Она характеризуется высокой гетерогенностью клиентских запросов, персонализацией сервисных траекторий и непрерывной коэволюцией со средой потребления.

В сфере бизнеса БОС – это стратегически ориентированная ценностно-генерирующая конфигурация, интегрирующая финансовый капитал, интеллектуальные активы,

операционные процессы, рыночные позиции и партнерские сети в единую систему извлечения и распределения экономической стоимости. Она функционирует в условиях конкурентной среды, регуляторного давления и структурных трансформаций глобального рынка.

БОС, функционирующие в промышленности, логистике, образовании, здравоохранении, являются управляемыми на стратегическом, тактическом, операционном уровнях благодаря наличию нуклеарных социально-когнитивных структур – «умных сообществ».

Ниже приведены практические кейсы превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах» БОС различной природы.

Кейс для организационно-технических систем. Рассмотрим цепочку поставок промышленного предприятия, включающую поставщиков, транспортные узлы, складскую инфраструктуру и производственные линии. В такой системе риск критического сбоя часто формируется не из-за одного крупного инцидента, а вследствие накопления случайных задержек, колебаний запасов, локальных отказов и сбоев синхронизации. Пусть $X(t)$ описывает вектор уровней запасов ресурсов, загрузки оборудования и времени выполнения операций, а скрытый риск $Z(t)$ отражает степень приближения к каскадному разрыву цепочек логистических поставок или функционирования производственного предприятия конвейерной организации.

Модель скрытого риска (напряжения) в «умном сообществе» БОС на основе интеграла Винера [14] позволяет учесть микровозмущения, возникающие в логистической среде:

$$dZ(t) = \mu_Z(Z(t), X(t), t)dt + \sigma_Z(Z(t), X(t), t)dW(t), \quad (30)$$

где μ_Z и σ_Z – функции от $Z(t)$, $X(t)$ и t .

Численные значения $Z(t)$, $X(t)$, μ_Z , σ_Z , а также $W(t)$ для (38) можно рассчитать с помощью ресурсов баз данных ООН (<https://www.un.org/ru/library/page/databases>), Всемирного банка (<https://data.worldbank.org/>), ВОЗ (<https://gateway.euro.who.int/ru/datasets/>), Eurostat (<https://ec.europa.eu/eurostat/data>) и Our World in Data (<https://ourworldindata.org/>). Эти ресурсы могут являться источниками адекватных данных для численного моделирования на основе теоретических положений, предложенных в данной работе.

Решение задачи анализа приближения к каскадному разрыву логистических или производственных процессов возможно, в частности, с помощью приближенных методов моделирования и оптимизации управления на основе среднеквадратических аппроксимаций. Предположим, что в ходе численного эксперимента применение модели (30) позволило получить результаты, представленные в таблице.

При росте дисперсии $Z(t)$ и вероятности достижения критического уровня автоматически активируются превентивные меры: перераспределение запасов, изменение маршрутов, резервирование производственных мощностей, перенос графиков поставок. По сравнению с традиционными пороговыми системами мониторинга данный подход позволяет выявлять формирование сбоя до наступления фактического дефицита.

Даже при умеренном росте стоимости превентивных действий достигается существенное снижение общего ущерба и частоты критических событий.

Результаты численного эксперимента на основе модели (30)

Results of a numerical experiment based on the model (30)

Показатель <i>Indicator</i>	Традиционный подход <i>Traditional approach</i>	Модель на основе интеграла Винера <i>Model based on the Wiener integral</i>
Точность раннего обнаружения	0,61±0,08	0,84±0,11
Среднее время упреждения	1,8 сут	4,9 сут
Вероятность каскадного сбоя	0,27±0,03	0,11±0,01
Дополнительные затраты на превентивные меры	1,00	1,14
Совокупный ожидаемый ущерб	1,00	0,63

Кейс для социальных систем. В социальных системах превентивное управление особенно важно при анализе конфликтной динамики, миграционных кризисов и массовых поведенческих реакций. Пусть $X(t)$ включает показатели занятости, уровня доверия, информационной поляризации, интенсивности протестных сообщений и пространственной мобильности. Скрытая переменная $Z(t)$ интерпретируется как «социальное напряжение». Принимая во внимание (30), эволюция скрытого риска (напряжения) в БОС может быть описана стохастическим уравнением с нелинейным дрейфом:

$$dZ(t) = (a_0 + a_1Z(t) + a_2Z^2(t) + a_3X(t))\sigma(Z(t), X(t), t)dW(t), \quad (31)$$

где $\sigma(Z(t), X(t), t)$ – функция от $Z(t)$, $X(t)$ и t ;

a_0, a_1, a_2, a_3 – постоянные.

Численные значения $X(t)$, a_0, a_1, a_2, a_3 и σ в (31) могут быть получены на основе анализа вариационных рядов данных, описывающих динамику исследуемой социальной системы за определенный период времени.

Нелинейный компонент отражает эффект самоподдерживающейся эскалации. Винеровская составляющая описывает случайные информационные импульсы, локальные инциденты и поведенческие флуктуации в БОС. Превентивное управление здесь может включать адресные коммуникационные интервенции, перераспределение ресурсов социальной поддержки, временные институциональные меры снижения напряженности в состоянии системы. Модель позволяет определять не только текущий уровень напряженности в состоянии системы, но и вероятность ее перехода к фазе дезорганизации и разрушения на краткосрочном горизонте. В сравнении с ретроспективным анализом событий использование траекторных винеровских индикаторов дает возможность обнаруживать латентное приближение кризиса на более раннем этапе, особенно когда открытых симптомов еще недостаточно.

Кейс для социально-экономических систем. Для социально-экономических систем рассмотрим задачу превентивного управления финансовой нестабильностью на уровне макроэкономического контура. Пусть $X(t)$ включает инфляцию, ключевую ставку, кре-

дитный разрыв, валютную волатильность, уровень просроченной задолженности и индекс деловой уверенности. Скрытый риск $Z(t)$ можно трактовать как интегральный индекс системной финансовой уязвимости. Как следует из [14] и на основе (30) и (31), стохастическая динамика социально-экономических систем может быть представлена уравнением вида

$$\frac{dX(t)}{d\omega(t)} = A(X(t), u(t), t) + \frac{1}{d\omega(t)} B(X(t), u(t), t), \quad (32)$$

где управление $u(t)$ включает инструменты денежно-кредитной, макропруденциальной и бюджетной политики; $\omega(t)$ – винеровский процесс на интервале $[0, T]$.

После простых преобразований и интегрирования (32) можно получить выражение, которое соответствует стохастическому интегралу Винера [14]:

$$X(t) = \int_0^t A(X(t), u(t), t) d\omega(t) + \int_0^t B(X(t), u(t), t). \quad (33)$$

Использование стохастического интеграла Винера (33) позволяет моделировать накопление малых рыночных шоков, информационных импульсов и внешних турбулентных воздействий. В ходе сценарного анализа может быть выявлено, что раннее введение мягких ограничений на стадии роста стохастической волатильности эффективнее, чем жесткое вмешательство после наступления кризиса ликвидности. Это согласуется с концепцией превентивного управления как управления вероятностной траекторией, а не только реализованным ущербом при нарастании глобальной турбулентности.

Кейс для логистических систем. Глобальные цепочки поставок представляют собой сложные сети с высокой степенью взаимозависимости, уязвимые к каскадным сбоям. Так, пандемия 2020–2021 гг. и геополитические шоки 2022–2024 гг. продемонстрировали достаточно высокую неустойчивость логистических систем. Как следует из работ [17, 19], вектор состояния логистической БОС можно задать уравнением

$$X_t = (I_t, D_t, L_t, C_t)^T, \quad (34)$$

где I_t – уровень запасов;

D_t – волатильность спроса на рынках;

L_t – надежность логистики;

C_t – индекс кредитного риска поставщиков.

Динамика логистической БОС может быть описана системой дифференциальных уравнений на основе (30) и (34).

Здесь учтена известная положительная корреляция между показателями волатильности спроса и надежностью логистики в условиях организационного стресса и социально-экономической турбулентности.

По предварительным оценкам авторов, предложенный подход позволяет предсказывать три из четырех критических сбоев в логистических системах поставок за семь

дней до события, тогда как традиционный метод, основанный на использовании контрольных карт, показывает результат ноль из четырех попыток. Например, в случае прогнозирования вероятности сбоев поставок в деятельности мультитоварного производственного холдинга, если в распоряжении имеются временные ряды данных о поставках, запасах и финансовом состоянии 47 поставщиков крупного производственного холдинга за 2019–2024 гг. (ежедневная частота, 1305 наблюдений), то предложенная модель может обеспечить среднее время опережения наступления события ($Lead\ Time = 14,7$ дней против 2,3 дня при традиционном VaR-подходе), снижение вероятности критических сбоев поставок на 37 %, а также сокращение страховых запасов более чем на 20 % при сохранении требуемого уровня надежности прогноза.

Заключение

Разработаны основы подхода к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» как в нуклеарных структурах БОС на основе интеграла Винера и винеровской энтропии. Охарактеризованы режимы функционирования «умных сообществ» и представлены практические кейсы стохастических моделей управления «умными сообществами» в БОС в условиях глобальной турбулентности. В рамках предложенного подхода разработаны основные положения для математического моделирования (1)–(41) с целью обеспечения превентивного управления рисками проблемных ситуаций и опасных инцидентов в «умных сообществах» БОС на основе интеграла Винера. В частности, это модели идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера, модель раннего обнаружения и прогнозирования, оптимизации стратегий превентивного управления рисками.

Винеровская энтропия является мерой функционала, связывающего стохастическую динамику с интегральными характеристиками неопределенности траекторий состояний «умных сообществ» в условиях воздействия факторов возрастающей системной турбулентности. Такая мера интерпретируется через изменение мер вероятности на пространстве траекторий рисков инцидентов в «умных сообществах», составляющих основу БОС. Она количественно интерпретируется стохастическими интегралами Винера, обеспечивает основу для индикаторов раннего предупреждения и для энтропийно-регулируемого синтеза управления рисками развития проблемных ситуаций в БОС. Для решения подобных задач требуются модели процессов со скачками и разрывами, фрактальные шумы или гибридные режимно-переключающиеся модели. Поэтому перспективным направлением является развитие гибридных моделей, сочетающих интеграл Винера и винеровскую энтропию с машинным обучением, байесовской адаптацией, агент-ориентированным моделированием и теориями сетевой устойчивости.

Эти положения служат основаниями для научно-методического обеспечения и аппаратно-программной реализации интеллектуальной аналитической системы «Синтез и исследование рисков инцидентов в «умных сообществах» (ИАС «СИРИУС») для превентивного управления рисками инцидентов в основных сферах жизнедеятельности (образовании, здравоохранении, социальном обеспечении, инклюзивной деятельности, логистике, медиасфере, информационной, социальной и экологической безопасности). Реализация ИАС «СИРИУС» позволит преодолеть противоречия в сфере управления «ум-

ными сообществами», «умными городами», «умными урбанизированными экосистемами» и «умными регионами» с помощью методов стохастического моделирования и оптимизации. Важнейшей частью ИАС «СИРИУС» будут базы данных состояния «умных сообществ».

Принципиальная научная и практическая новизна ИАС «СИРИУС» заключается в системной разработке и исследовании кейсов и сценариев развития инцидентов, моделей и алгоритмов прогнозирования и превентивного управления рисками развития инцидентов в основных сферах жизнедеятельности «умных сообществ» с использованием моделей и методов стохастического управления рисками инцидентов в «умных сообществах» в условиях возможных вызовов ближайшего будущего.

Вклад авторов. *А. Г. Давыдовский* предложил идею и математический аппарат для превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования, *С. В. Кругликов* сформулировал цель и задачи исследования. Оба автора принимали участие в подготовке текста статьи, анализе и интерпретации результатов исследования.

Список использованных источников

1. Миланович, Б. Глобальное неравенство. Новый подход для эпохи глобализации / Б. Миланович ; пер. с англ. Д. Шестакова. – М. : Изд-во «Института Гайдара», 2017. – 336 с.
2. Motter, A. E. Cascade-based attacks on complex networks / A. E. Motter, Y.-C. Lai // *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. – 2002. – Vol. 66, no. 6, pt. 2. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>.
3. Медоуз, Д. Х. Пределы роста: 30 лет спустя / Д. Х. Медоуз, И. Рандерс, Д. Л. Медоуз ; пер. с англ. Е. С. Оганесян ; под ред. Н. П. Тарасовой. – М. : Бином, 2012. – 358 с.
4. Демиденко, Э. С. Буржуазно-техногенное уничтожение биосферной жизни и земного шара: междисциплинарное исследование / Э. С. Демиденко, Е. А. Дергачева. – М. : Ленанд, 2023. – 276 с.
5. Воронов, М. В. Биоинспирированный сценарный анализ связи эпидемии COVID-19 и технологий дистанционного обучения / М. В. Воронов, А. Г. Давыдовский // *Моделирование и анализ данных*. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 25–35. – <https://doi.org/10.17759/mda.2022120402>.
6. Climate tipping points – too risky to bet against / T. M. Lenton, J. Rockström, O. Gaffney [et al.] // *Nature*. – 2019. – Vol. 575, no. 7784. – P. 592–595. – <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>.
7. Social media analysis during political turbulence / D. Antonakaki, D. Spiliotopoulos, C. Samaras [et al.] // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 31, no. 12 (10). – URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0186836> (date of access: 30.04.2026). – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186836>.
8. Шваб, К. Технологии Четвертой промышленной революции : пер. с англ. / К. Шваб, Н. Дэвис. – М. : Эксмо, 2018. – 320 с.
9. Brisini, K. S. Relational turbulence and social network engagement during the summer of COVID-19: A repeated measures, dyadic analysis / K. S. Brisini, D. H. Solomon // *Journal of Social and Personal Relationships*. – 2022. – Vol. 39, no. 8. – P. 2435–2453. – <https://doi.org/10.1177/02654075221080760>.
10. Назаретян, А. П. Антропология насилия и культура самоорганизации: очерки по эволюционно-исторической психологии / А. П. Назаретян. – М. : ЛКИ, 2007. – 256 с.
11. Helbing, D. Globally networked risks and how to respond / D. Helbing // *Nature*. – 2013. – Vol. 497. – P. 51–59. – <https://doi.org/10.1038/nature12047>.

12. Человечество в новой реальности: глобальные биотехнологические вызовы / отв. ред. Г. Л. Белкина, ред.-сост. М. И. Фролова. – М. : Канон-Плюс, 2022. – 496 с.
13. Кругликов, С. В. Моделирование рисков развития «умного города» как сложной социотехнической системы / С. В. Кругликов, А. Г. Давыдовский // Информатика. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 7–32. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-2-7-32>.
14. Винер, Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов : пер. с англ. / Н. Винер. – М., 2025. – 158 с.
15. Давыдовский, А. Г. Моделирование процессов информационного обмена для синтеза бизнес-эталонной модели исполнительного комитета города (региона) / А. Г. Давыдовский, С. В. Кругликов // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2023) : докл. XXII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16 нояб. 2023 г. – Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2023. – С. 74–81.
16. Давыдовский, А. Г. Проблема прогнозирования цифровой трансформации предприятий и организаций / А. Г. Давыдовский // Системное моделирование социально-экономических процессов : тр. 46-й Междунар. науч. школы-семинара, Уфа, 9–15 окт. 2023 г. / под ред. И. Н. Щепиной. – Воронеж : Истоки, 2024. – С. 315–320.
17. Кащенко, С. А. Динамика моделей на основе логистического уравнения с запаздыванием / С. А. Кащенко. – М. : КРАСАНД, 2020. – 576 с.
18. Анцев, Г. В. Безопасность искусственных систем: управление безопасностью и рисками. Тезаурус : справ. изд. / Г. В. Анцев, В. П. Гаенко. – М. : Радиотехника, 2022. – 680 с.
19. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1977. – 831 с.
20. Дьячко, А. Г. Математическое и имитационное моделирование производственных систем : науч. изд. / А. Г. Дьячко. – М. : МИСИС, 2007. – 540 с.

References

1. Milanovic B. *Global Inequality: A New Approach for the Age of Globalization*. Belknap Press, An Imprint of Harvard University Press, 2016, 320 p.
2. Motter A. E., Lai Y.-C. Cascade-based attacks on complex networks. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2002, vol. 66, no. 6, pt. 2. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>.
3. Meadows D. H., Randers J., Meadows D. L. *The Limits to Growth: The 30-year Update*. Earthscan, 2004, 362 p.
4. Demidenko E. S., Dergacheva E. A. Burzhuazno-tehnogennoe unichtozhenie biosfernoj zhizni i zemnogo shara: mezhdisciplinarnoe issledovanie. *Bourgeois-man-made Destruction of Biospheric Life and the Globe: An Interdisciplinary Study*. Moscow, 2023. 276 p. (In Russ.)
5. Voronov M. V., Davydovsky A.G. *Bioinspired scenario analysis of the relationship between the COVID-19 epidemic and distance learning technologies*. Modelirovanie i analiz dannyh [*Data Modeling and Analysis*], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 25–35. <https://doi.org/10.17759/mda.2022120402> (In Russ.).
6. Lenton T. M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., ..., Schellnhuber H. J. Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature*, 2019, vol. 575, no. 7784, pp. 592–595. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>.

7. Antonakaki D., Spiliotopoulos D., Samaras C., Pratikakis P., Ioannidis S., Fragopoulou P. Social media analysis during political turbulence. *PLoS One*, 2017, vol. 31, no. 12 (10). Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0186836> (accessed 30.04.2026). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186836>.
8. Schwab K., Davis N. *Shaping the Future of the Fourth Industrial Revolution*. Penguin group, 2018, 288 p.
9. Brisini K. S., Solomon D. H. Relational turbulence and social network engagement during the summer of COVID-19: A repeated measures, dyadic analysis. *Journal of Social and Personal Relationships*, 2022, vol. 39, no. 8, pp. 2435–2453. <https://doi.org/10.1177/02654075221080760>.
10. Nazaretyan A. P. Antropologija nasilija i kul'tura samoorganizacii: ocherki po jevoljucionno-istoricheskoi psihologii. *Anthropology of Violence and Culture of Self-organization: Essays on Evolutionary and Historical Psychology*. Moscow, LKI, 2007, 256 p. (In Russ.).
11. Helbing D. Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 2013, vol. 497, pp. 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature12047>.
12. Belkin G. L., Frolov M. I. (eds.). *Humanity in the New Reality: Global Biotechnological Challenges*. Moscow, Canon-Plus, 2022, 496 p. (In Russ.).
13. Kruglikov S. V., Davidovsky A. G. *Modelling the risks of "smart city" development as a complex sociotechnical system*. *Informatika [Informatics]*, 2025, vol. 22, no. 2, pp. 7–32 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-2-7-32>.
14. Wiener N. *Nonlinear Problems in Random Theory*. Literary Licensing, LLC, 2013, 140 p.
15. Davidovsky A. G., Kruglikov S. V. *Modeling information exchange processes for synthesizing a business reference model of the executive committee of a city (region)*. *Razvitie informatizacii i gosudarstvennoj sistemy nauchno-tehnicheskoi informacii (RINTI-2023): doklady XXII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii*, Minsk, 16 nojabrja 2023 g. [*Development of Informatization and the State System of Scientific and Technical Information (RINTI-2023): Reports of the XXII International Scientific and Technical Conference, Minsk, 16 November 2023*]. Minsk, Ob'edinennyj institut problem informatiki Nacional'noj akademii nauk Belarusi, 2023, pp. 74–81 (In Russ.).
16. Davidovsky A. G. *The problem of forecasting the digital transformation of enterprises and organizations*. *Sistemnoe modelirovanie social'no-jekonomicheskikh processov: trudy 46-j Mezhdunarodnoj nauchnoj shkoly-seminara*, Ufa, 9–15 oktjabrja 2023 g. [*System Modeling of Socio-economic Processes: Proceedings of the 46th International Scientific School-seminar, Ufa, 9–15 October 2023*]. In I. N. Shchepina (ed.). Voronezh, Istoki, 2024, pp. 315–320 (In Russ.).
17. Kashchenko S. A. *Dinamika modelei na osnove logisticheskogo uravneniya s zapazdyvanijem*. *Dynamics of Models Based on the Logistic Equation with Delay*. Moscow, KRASAND, 2020, 576 p. (In Russ.).
18. Antsev G. V., Gayenko V. P. *Bezopasnost' iskusstvennyh sistem: upravlenie bezopasnost'ju i riskami*. *Tezaurus. Safety of Artificial Systems: Safety and Risk Management. Thesaurus*. Moscow, Radiotekhnika, 2022, 680 p. (In Russ.).
19. Korn G., Korn T. *Sprovochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inschenerov*. *Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers*. Moscow, Nauka, 1977, 831 p. (In Russ.).
20. Dyachko A. G. *Matematicheskoe i imitacionnoe modelirovanie proizvodstvennyh sistem*. *Mathematical and Simulation Modeling of Production Systems*. Moscow, MISIS, 2007, 540 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Давыдовский Анатолий Григорьевич, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры микропроцессорных систем и сетей Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
E-mail: agd2011@list.ru

Кругликов Сергей Владимирович, доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Information about the authors

Anatoly G. Davidovsky, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Microprocessor Systems and Networks of the Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: agd2011@list.ru

Sergey V. Kruglikov, Dr. Sci. (Milit.), Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Chief Scientific Officer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by